

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

ШАНЬ Цзиго

УДК 621.791.372

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СВЕТОЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

05.03.06 —

технология и оборудование для сварки и родственных
процессов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1996





Работа выполнена в Институте
НАН Украины.

Научный руководитель

доктор технических наук
профессор Хорунов В. Ф.

Официальные оппоненты

доктор технических наук
профессор Россошинский А. А.

кандидат технических наук
доцент Самохин С. М.

Ведущее предприятие - Научно-производственное предприятие
"Машпроект".

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации аспиранта Шань Цзиго. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения принять участие в заседании специализированного совета или прислать свои отзывы (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650, г. Киев-5, ГСП, ул. Боженко, 11, ученому секретарю спецсовета.

Защита состоится "10" июня 1996 г. на заседании специализированного совета (К 50.02.02) при Институте электросварки им. Е. О. Патона.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке института.

Автореферат разослан "07" мая 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук

Бондарев А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.
АННОТАЦИЯ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. В современной промышленности пайка занимает все более заметное место, а в таких отраслях, как электроника, приборостроение, авиационное двигателестроение, ракетостроение она прочно занимает лидирующие позиции. В области высокотемпературной пайки основные достижения связываются с печной пайкой, в частности вакуумной, когда осуществляется общий нагрев изделия, а наблюдение за контролем процесса пайки затруднено.

Настоятельной необходимостью сегодняшнего дня является разработка локального способа нагрева изделий, который можно осуществлять в любой среде и легко контролировать. В частности, такая проблема стоит в области ремонтной пайки деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, например, лопаток турбин.

Для решения подобных проблем в последнее время часто привлекают лазер. Но лазер дорог, имеет низкий к. п. д. Весьма актуально рассмотреть возможность светолучевого нагрева как альтернативы лазеру для пайки широкого круга материалов, и, в частности, высоколегированных никелевых сплавов. Этому и посвящена настоящая работа.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Оценить технологические возможности светолучевого нагрева; получить данные о структуре, статической прочности и долговечности соединений, паянных световым лучом под флюсом и в защитных средах.

Для решения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Оценить технологические возможности светолучевого нагрева в сравнении с традиционными методами пайки металлов и сплавов с использованием модернизированной светолучевой установки УРАН-1.
2. Изучить структуру и свойства паяных соединений нержавеющей стали, меди, латуни, алюминия.
3. Провести компьютерное прогнозирование поверхности ликвидуса диаграммы состояния системы Ni-Cr-Zr на основе данных двойных диаграмм и с учетом полученных данных выбрать состав припоя для пайки высоколегированных никелевых сплавов.
4. Создать основы технологии ремонтной пайки деталей горячего тракта газотурбинных двигателей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ. Исследование структуры паяных соединений осуществлялось с использованием методов оптической металлографии, локального микрорентгеноспектрального анализа, растровой микроскопии. Прочностные характеристики паяных соединений определялись по стандартным методикам. Для оценки прочности на растяжение нахлесточных соединений тонколистовых материалов использована уточненная методика. Прогнозирование поверхности ликвидуса сплава системы Ni-Cr-Zr осуществлялось путем компьютерного моделирования.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. 1. Установлено, что нагрев световым лучом не изменяет, как правило, фазовый состав паяных швов различных металлических материалов, оказывая влияние на объемную долю фаз, их дисперсность и характер распределения в структуре.

2. На основании систематических исследований впервые показано, что стыковые и нахлесточные соединения нержавеющей стали, меди, латуни, алюминия, паянные световым лучом высокотемпературными припоями (систем Cu-Mn, Cu-Zn, Cu-P, Ni-Mn, Al-Si), по прочности не уступают, а, как правило, превосходят однотипные соединения, паянные традиционными способами (ТВЧ и газовым пламенем).

3. Экспериментально установлено, что пайка световым лучом нахлесточных соединений стали 12Х18Н10Т обеспечивает увеличение в два раза долговечности в малоцикловой области усталости при использовании припоя системы Cu-Mn; сопротивление усталости соединений, паянных припоем системы Cu-Zn, не зависит от метода нагрева.

4. Проведена статистическая обработка данных о прочности на сдвиг паяных соединений в зависимости от размера нахлестки. Установлено, что с уменьшением размера нахлестки среднестатистическое значение прочности возрастает, однако нижняя граница значений прочности для 90% вероятности рассеяния не зависит от размера нахлестки.

5. Освоена методика компьютерного прогнозирования поверхности ликвидуса тройных систем на базе данных двойных диаграмм. Впервые построена поверхность ликвидуса системы Ni-Cr-Zr, а также более детально - часть поверхности в области никелевого угла.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ следующие положения:

1. Научно-обоснованные технологические рекомендации светолучевой пайки с использованием модернизированной установки УРАН-1.

2. Уточненная методика определения напряжений сдвига в нахлесточных соединениях из тонколистовых материалов.

3. Данные о статической прочности и работоспособности соединений стали 12Х18Н10Т в зависимости от состава припоя, величины нахлестки и метода нагрева.

4. Данные о структуре и статической прочности соединений из сплавов на основе меди и алюминия.

5. Результаты компьютерного прогнозирования поверхности ликвидуса системы Ni-Cr-Zr на базе данных двойных диаграмм.

6. Рекомендации по технологии и технике ремонтной пайки лопаток турбин.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. На основании проведенного комплекса исследований установлено, что светолучевой нагрев может успешно применяться взамен ТВЧ и газопламенного нагрева для широкого круга изделий и материалов. Особую ценность этот процесс приобретает в случае использования для соединения и ремонта высоколегированных жаропрочных, высокоактивных материалов. В частности, процесс опробован при ремонте лопаток турбин ГТД.

ПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Отдельные положения диссертационной работы докладывались на международной конференции "Сварные конструкции" (Киев, 1995 г.).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на технологическом семинаре ИЭС им. Е. О. Патона (1996 г.).

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы. Работа содержит 168 страниц, в том числе 118 страниц машинописного текста, 29 рисунков, 25 таблиц и библиографию из 137 наименований.

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна полученных результатов и их практическая ценность, положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор и критический анализ современного состояния применения светолучевого нагрева в области сварки, пайки и обработки поверхности изделий.

Во второй главе описаны материалы, методики исследований структуры и свойств паяных соединений, усовершенствованная светолучевая установка для пайки, разработанная технология пайки различных материалов.

В третьей главе изложены результаты исследований влияния пайки световым лучом на структуру и механические свойства соединений нержавеющей стали, меди, латуни, алюминия.

В четвертой главе представлен результат компьютерного прогнозирования поверхности ликвидус сплава Ni-Cr-Zr, изложены данные об исследовании структуры и свойств соединений литейных никелевых сплавов, паянных световым лучем припоем ВПр-42 и композиционным припоем с цирконием. Описаны результаты ремонтной пайки лопат ГТД.

В общих выводах сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Несмотря на большое разнообразие источников нагрева, таких как электрическая дуга, газовое пламя, ТВЧ, плазменная дуга, электронный луч, лазер, практика часто ставит задачи, требующие существенной модернизации имеющихся или разработки новых источников нагрева с целью обеспечения высокой производительности и качества получаемых конструкций. Так, появление галлоидных кварцевых ламп инфракрасного излучения позволило создать целую отрасль промышленности по производству сотовых панелей. Качество последних, производительность технологических процессов находится на уровне, недостижимом для традиционных способов нагрева.

До последнего времени не удавалось решить задачу скоростного локального нагрева под пайку. Сейчас эта задача во многих случаях успешно решается с помощью лазера. Однако лазер дорог, имеет низкий к. п. д. Поэтому естественно поиски альтернативных вариантов. Одним из них является световой луч.

С помощью фокусирующих оптических систем световой луч обеспечивает в пятне нагрева к. п. д. до 40% потребляемой электрической мощности, сравнительно высокую плотность энергии (10^4 Вт/см²), и требуемые формы и размеры пятна нагрева, что делает нагрев световым лучом достаточно гибким технологическим процессом при пайке и сварке. Отличительной особенностью нагрева световым лучом являет-

ся бесконтактность подвода лучистой энергии к объекту нагрева, что обеспечивает идеальную чистоту процесса нагрева. Вместе с тем широкое применение достижений в области светолучевого соединения материалов сдерживается из-за слабой изученности свойств соединений, выполненных этим способом.

В связи с этим оценка влияния светолучевого нагрева при пайке на структуру и механические свойства паяных соединений в сравнении с традиционными способами пайки (нагрев токами высокой частоты, нагрев газовым пламенем), а также поиск его новых возможностей в том направлении, где сложно реализуются существующие технологии пайки, являются актуальной задачей.

Для выполнения данной задачи усовершенствована светолучевая установка УРАН-1, обеспечивающая проведение процесса пайки движущимися или неподвижными источниками нагрева на воздухе, в газовой защитной атмосфере и в вакууме. В качестве материалов для экспериментов выбраны алюминий АД1, медь М1, латунь Л59, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, а также припой ПМ-50 (Cu-Zn), ПМ-72 (Cu-Mn), ПМ-90 и ПМ-90М (Cu-P), ПНС-6 и ПР-Н58Ф (Ni-Mn), ПАК-12П (Al-Si).

Для исследования структуры и определения работоспособности паяных соединений использовались нахлесточные и стыковые соединения из тонколистовых (б<2 мм) пластин шириной 20 мм, отвечающие по профилю сечения соединениям в реальных конструкциях.

Пайка образцов припоями на основе Ni-Mn выполнена в вакууме $1 \cdot 10^{-3}$ Па. В иных случаях пайка проводилась на воздухе под флюсом ФАФ-540 для алюминия АД1 и ПВ-209 для остальных материалов.

Отработана технология пайки тонколистовой стали 12Х18Н10Т, алюминия АД1, меди М1 и латуни Л59 с применением соответствующих припоев на воздухе или в вакууме.

С целью выяснения возможного влияния способа пайки световым лучом на структуру и работоспособность стыковых соединений меди с медью и меди с латунью паяли однотипные образцы световым лучом и газовым пламенем. При металлографических исследованиях соединений не обнаружили принципиальных отличий в микроструктуре шва. В обоих случаях микроструктура шва представляет собой высоколегированный твердый раствор на основе меди с темными включениями фосфида меди и белыми включениями фазы Cu-Sn-Sb.

Таким образом, нагрев световым лучом при пайке меди и меди с латунью припоем системы Cu-P не оказывает влияние на фазовый сос-

тав паяных соединений. В то же время пайка световым лучом обеспечивает более высокое качество формирования паяного шва.

На образцах основного металла и стыковых соединений меди и меди с латунью определены технический предел упругости - $\sigma_{0.01}$, условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$, временное сопротивление разрыву σ_B , модуль упругости E , относительное удлинение при разрушении δ и сужение в зоне разрушений ψ . Рабочая часть образца, т.е. расчетная длина L_0 определялась как пятикратная по зависимости $L_0 = 5.6/\sqrt{S_0}$, где $S_0 = s \cdot b$ - площадь сечения рабочей зоны образца.

Установлено, что стыковые соединения меди, паянные световым лучом, обладают прочностью на 27% ниже значения σ_B основного металла. Медно-латунные стыковые соединения достигают всего лишь 60% (для газовой пайки) и 65% (для светолучевой) прочности соединений меди, а их значения σ_B - сопоставимы с пределами упругости $\sigma_{0.01}$ латуни в зоне термовлияния. Способ пайки световым лучом позволяет в большей мере, чем газовая пайка, реализовать прочностные свойства основного металла: σ_B стыковых соединений на 15-26% выше в случае применения светового луча, чем при газовой пайке. Предел упругости $\sigma_{0.01}$ и предел текучести $\sigma_{0.2}$ соединений определяется медной частью соединения и имеет в соединениях меди и меди с латунью такие же значения, как и в медных образцах, прошедших подобный термический цикл пайки. Модуль упругости в медно-латунных соединениях занимает промежуточное значение между модулями упругости медной и латунной частями образца. Причем модуль упругости латуни на 25% ниже, чем у меди.

Полученные данные о закономерности деформирования паяных соединений показывают, что образцы основного металла деформируются неравномерно, в зоне разрушения локальное относительное удлинение в два раза выше, чем за его пределами. А паяные соединения деформируются в основном равномерно с некоторым сдерживанием деформации в шве и околошовной зоне. Разрушение происходит по шву и не реализуется полностью запас пластичности основного металла околошовных зон. Такая же закономерность характерна для соединений меди и меди в медно-латунных соединениях. Для латуни при разрушении характерно незначительное локальное пластическое деформирование лишь вблизи шва. Остальные участки латунной части деформируются упруго.

Микроструктура шва алюминия АД1, паянного припоем системы Al-Si, представляет собой твердый раствор на основе алюминия и включения эвтектики алюминия с кремнием. При испытаниях на растяжение паяные образцы нахлесточных тонколистовых соединений алюминия АД1 разрушались по основному металлу. При этом предел прочности шва $\sigma_{\text{в}}$ составлял 0.9 значения прочности основного металла. По этому показателю прочность шва, паянного световым лучом, не уступает способу пайки ТВЧ, который обеспечивает прочность паяного шва 0.7...0.9 прочности основного металла.

В металле шва из стали 12Х18Н10Т, паянных световым лучом в вакууме припоями ПНС-6 и ПР-Н58Ф (системы Ni-Mn), зафиксирована трехфазная структура: твердый раствор, эвтектические фазы, и крупные иглообразные включения.

Для исследования работоспособности нахлесточных соединений определяли влияние типа припоя и размера нахлестки на сопротивление срезу. Варьировали размеры нахлестки от 1 до 5 мм.

Известно, что при испытаниях на растяжение нахлесточных соединений происходит смешанный тип разрушений: кроме напряжений сдвига действуют в шве напряжения отрыва. При этом происходит отгибание кромок основного металла на участках нахлестки. В этом случае, временное сопротивление паяного шва на сдвиг без учета угла наклона плоскости шва, рассчитанный по формуле

$$\tau_{\text{вш}} = \frac{P}{b \cdot h} \quad (1)$$

где: b - ширина образца, h - размер нахлестки, P - усилие разрушения, соответствует суммарным напряжениям сдвига τ_{α} и отрыва σ_{α} на наклонной плоскости.

Целесообразно рассчитывать напряжение сдвига в шве с учетом отгибания кромок:

$$\tau_{\alpha} = \sigma_{\text{вш}} * \cos \alpha * \sin \alpha; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{вш}} = \frac{P}{b \cdot s};$$

или
$$\tau_{\alpha} = \tau_{\text{вш}} * \sin \alpha; \quad (3)$$

$$\tau_{\text{вш}} = \frac{P}{b \cdot h};$$

где s - толщина соединения в зоне разрушения.

Значения h , S и α измеряют после разрушения образцов.

На практике можно применять формулу 2 или 3 с учетом того, какое из значений S и h более точно замеряется после разрушения образцов.

Для определения прочности на сдвиг нахлесточных соединений нержавеющей стали 12Х18Н10Т, паянных световым лучом в вакууме припоями системы Ni-Mn, выбрана формула 3. Установлено, что при уменьшении размеров нахлестки от 5 до 1 мм наблюдается существенное повышение $\tau_{\text{сд}}$. Для припоя ПНС-6 прочность увеличилась в 1.06 раз, а для припоя ПР-Н58Ф - в 1.87 раз. В целом соединения, паянные припоем ПР-Н58Ф, имеют прочность на сдвиг выше на 14...26%, чем соединения, паянные припоем ПНС-6.

Проведенные эксперименты показали возможность применения светового луча в качестве источника нагрева для вакуумной пайки ответственных изделий.

Для исследования структуры и прочности соединений из тонколистовой стали 12Х18Н10Т, паянных припоями ПМ-50 (Cu-Zn) и ПМ-72 (Cu-Mn), выбрали образцы с нахлесточными соединениями. Размер образцов составил 180*20*1 мм. Варьировали размеры нахлестки (1 и 5 мм). Однотипные образцы паяли также с использованием ТВЧ.

Металлографические исследования показали, что в соединениях, паянных припоем ПМ-50 световым лучом и ТВЧ, металл шва представляет собой твердый раствор Zn, Mn, Ni, Sn в меди, содержащей дисперсные включения двух видов. Светлые включения характеризуются высоким содержанием Fe и Cr, Si, Mn, а темные - высоким содержанием Cu, Zn и пониженным содержанием Fe и Cr.

Анализ литой прослойки соединения показал, что химический состав шва и галтели практически не отличается друг от друга, и не зависят от способа нагрева. Однако количество выделенных светлых фаз в структуре шва, паянного световым лучом, существенно меньше, чем при пайке ТВЧ.

В случае применения припоя ПМ-72 (Cu-Mn) микроструктура шва представляет собой твердый раствор Mn и других легирующих элементов (Ni, Cr, Si, Fe) в меди, содержащей округлые светлые включения с высоким содержанием железа, марганца, хрома и кремния. Вдоль границ зерен твердого раствора наблюдаются светлые прослойки ликвационного происхождения с повышенным содержанием марганца. Определение химического состава в отдельных фазовых составляющих

показали, что твердый раствор в обоих случаях имеет почти одинаковый химический состав. Однако при пайке световым лучом содержание железа и хрома в выделенных фазах на фоне твердого раствора выше, чем при пайке ТВЧ.

При статических испытаниях на растяжение образцы разрушались по шву (припой ПМ-50 и ПМ-72 для нахлестки 5 мм и 1 мм) и по основному металлу (припой ПМ-72 для нахлестки 5 мм).

Разрушающие напряжения сдвига τ_{κ} рассчитывали с учетом угла α и по формуле 2.

Разрушение паяных образцов при усталостных испытаниях вызвано образованием и распространением трещины в галтельных участках соединения. При высоких уровнях напряжений ($\sigma_{\max} > \sigma_{0.2}$) усталостные трещины зарождались в металле галтели, а при низких - в основном металле на границе с галтелью шва. Результаты представлены на рис. 1 и в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнение данных испытаний на растяжение нахлесточных соединений стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, паянных световым лучом и ТВЧ.

Тип припоя	Способ нагрева при пайке	Величина нахлестки, мм	τ_{κ} , МПа	S_{σ} , МПа	$\hat{\tau}_{\kappa}$, МПа	$\bar{\sigma}_{\text{вн}}$, МПа	S_{σ} , МПа	$\hat{\sigma}_{\text{вн}}$, МПа
ПМ-50	Свет. луч	5	116,5	6,47	103,5	не определялись		
	ТВЧ*	5	107,0	не определялись				
ПМ-72	Свет. луч	5	140,3	8,02	124,3	не определялись		
	ТВЧ*	5	115,0	не определялись				
ПМ-50	Свет. луч	1	125,1	24,92	75,3	294,0	55,87	182...406
	ТВЧ*	1	не определялись					245...290
ПМ-72	Свет. луч	1	172,1	22,10	127,9	344,3	43,75	257...432
	ТВЧ*	1	не определялись					330...400

* Среднеарифметические значения по данным трех испытаний.

** Диапазон экспериментальных значений.

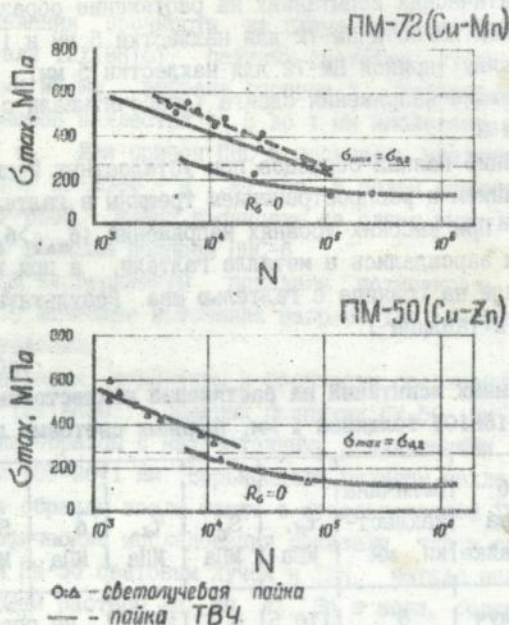


Рис. 1. Кривые усталости нахлесточных соединений стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, полученных пайкой ТВ4 и световым лучом с использованием припоев ПМ-72 и ПМ-50.

Сопоставлением с данными испытаний в таких же условиях циклических нагружений однотипных соединений, паянных ТВ4, установлено, что способ светолучевой пайки оказывает заметное повышение (в 2 раза) долговечности в малоцикловой области усталости при использовании припоя ПМ-72. С повышением уровня циклического нагружения этот эффект становится более заметным. При использовании припоя ПМ-50 эффект повышения долговечности не проявляется. Не оказывает влияние на долговечность способ пайки и в многоцикловой

области усталости, поскольку в этой области долговечность определяется сопротивлением усталости околосшовной зоны соединения и высоким уровнем концентрации напряжений.

Статистические оценки характеристик прочности нахлесточных соединений с нахлесткой 1 и 5 мм показывают, что рассеяние значений напряжений на сдвиг увеличивается с уменьшением размера нахлестки. В то же время средние значения $\bar{\sigma}_{сдв}$ с уменьшением размера нахлестки возрастают.

Для соединений с нахлесткой 5 мм способ пайки световым лучом припоем ПМ-72 способствует повышению на 20% прочности на растяжение, по сравнению с пайкой ТВЧ. В случае использования припоя ПМ-50 этот показатель повышается на 9%.

Для соединений с нахлесткой 1 мм среднестатистические значения прочности на сдвиг выше на 23% для припоя ПМ-72 и на 7% для припоя ПМ-50, чем у соединений с нахлесткой 5 мм, а по предельным значениям прочности на растяжение не уступают однотипным соединениям, паянным ТВЧ. Таким образом, способ пайки световым лучом дает лучшие результаты по показателю $\sigma_{сдв}$, чем способ пайки ТВЧ. При этом наибольшее различие получено в случае применения припоя ПМ-72.

Проведенные нами систематические исследования структуры и механических свойств паяных соединений различных металлов, выполненных световым лучом, создают предпосылку рекомендовать его для производства ответственных изделий. К таким изделиям можно отнести различные узлы, например, лопатки горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД), которые изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов путем точного литья. Известно, что способ точного литья обеспечивает очень низкий уровень выхода годной продукции из-за образования поверхностных пор и усадочных раковин, поэтому ремонт этих дефектов является весьма актуальной задачей. Так как литейные дисперсионно-твердеющие никелевые сплавы обладают неудовлетворительной свариваемостью, наиболее перспективным способом ремонта является высокотемпературная вакуумная пайка.

Технологический процесс пайки в вакууме с общим нагревом позволяет получить качественные соединения с высокими свойствами (0,7...0,8 прочности паемых материалов). Однако такой метод пайки энергоемкий, требует нагрева до высокой температуры всей лопатки. Пайка с общим нагревом может приводить к ухудшению плот-

ности жаростойких покрытий, иногда к существенному изменению структуры, охрупчиванию и снижению эксплуатационных характеристик. Во избежание вышесказанного, предпочтение отдают пайке с местным нагревом, например, используя дуговой разряд в вакууме полым катодом. Однако такой способ не является оптимальным среди источников для локального нагрева из-за недостатков: опасность образования трещин из-за ограничения свободного перемещения металла под действием термического цикла; низкой производительностью процесса из-за неудовлетворительной долговечности полых термоэмиссионных катодов; ограничения применения процесса дуговой пайки с неподвижным пятном нагрева из-за небольшого рамера пятна нагрева.

На основе анализа существующих способов пайки в вакууме для исправления дефектов лопаток ГТД и результатов проведенных нами исследований соединений, паянных световым лучом, установлено, что световой луч приемлем для исправления дефектов лопаток ГДТ.

Важной задачей является выбор припоев для пайки литейных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов.

Анализируя литературные данные, можно сделать вывод, что в большинстве случаев для пайки жаропрочных никелевых сплавов применяются припои систем Ni-Cr-B, Ni-Cr-Si, Ni-Cr-B-Si, Ni-Cr-P, Ni-Pb-Cr-Si, Ni-Mn-Cr-Si. Наилучшей растекаемостью по поверхности жаропрочных никелевых сплавов обладают припои с бором. Однако негативное влияние бора на основной материал вследствие образования хрупких боридов в диффузионной зоне паяного шва, низкая прочность паяных соединений при широких паяльных зазорах очень часто делают нежелательным применение борсодержащих припоев для пайки конструкций, подверженных динамическим нагрузкам. Более перспективно использовать в качестве депрессантов такие элементы, как титан, цирконий, гафний. Известно, что припои, содержащие эти элементы, хорошо смачивают и растекаются по подложкам из жаропрочных никелевых сплавов. Среди новых систем припоев можно отличить сплавы системы Ni-Cr-Zr, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Припои этой системы не охрупчивают основной материал, а в дугах паяных швах микротвердость эвтектики находится на уровне микротвердости основного материала. При этом обеспечивается высокий уровень прочностных характеристик паяных соединений.

Таким образом, припой системы Ni-Cr-Zr можно применять для ремонта литых деталей из жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов.

Составы припоев системы Ni-Cr-Zr могут изменяться в широких концентрационных пределах. При этом нужно соблюдать ограничение температурно-временных параметров пайки. Однако к настоящему времени сведения о температуре ликвидус трехкомпонентных и более сложных сплавов практически отсутствуют. В данном случае практический интерес представляет использование компьютерного прогнозирования поверхностей ликвидус трехкомпонентных сплавов системы Ni-Cr-Zr.

Из анализа литературных данных следует, что более предпочтительным в построении диаграмм состояния является применение метода симплексных решеток, который относится к безградиентным методам поиска оптимума.

С целью определения точности метода симплексных решеток при построении поверхностей ликвидус нами проведена компьютерная обработка трехкомпонентных диаграмм состояния металлических систем с различным типом взаимодействия. В результате установлено, что необходимая точность расчетов поверхности ликвидус тройной системы обеспечивается с помощью полинома соответствующей степени вида в зависимости от того, каким образом взаимодействуют компоненты припоев.

Для системы с неограниченной растворимостью и плавными изменениями линий ликвидуса высокая точность расчетов обеспечивается полиномами второй степени. Для системы с эвтектическим взаимодействием - полиномом неполной или полной третьей степени.

Для описания поверхности ликвидус трехкомпонентной с несколькими эвтектиками и химическими соединениями, требуется полином четвертой степени:

$$\begin{aligned}
 Y = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\
 & + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \\
 & + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \\
 & + \beta_{1123} x_1^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 x_2^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 x_3^2.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Адекватность модели следует проверять в каждой контрольной точке при использовании критерия t (критерия Стьюдента):

Если модель оказывается неадекватной, то следует перейти к приближению более высоких степеней путем достройки симплексной решетки.

Такой метод для расчета поверхности ликвидус сплавов Ni-Cr-Zr нами применен в программе QuattroPro 4.0, с помощью которой удалось определить коэффициенты полинома, то есть оптимизировать их с учетом минимума суммы квадратов отклонений в задаваемых точках.

Полученная расчетным путем поверхность (рис. 2) подтверждает данные о температуре ликвидус в этой области концентрации, полученные опытным путем.

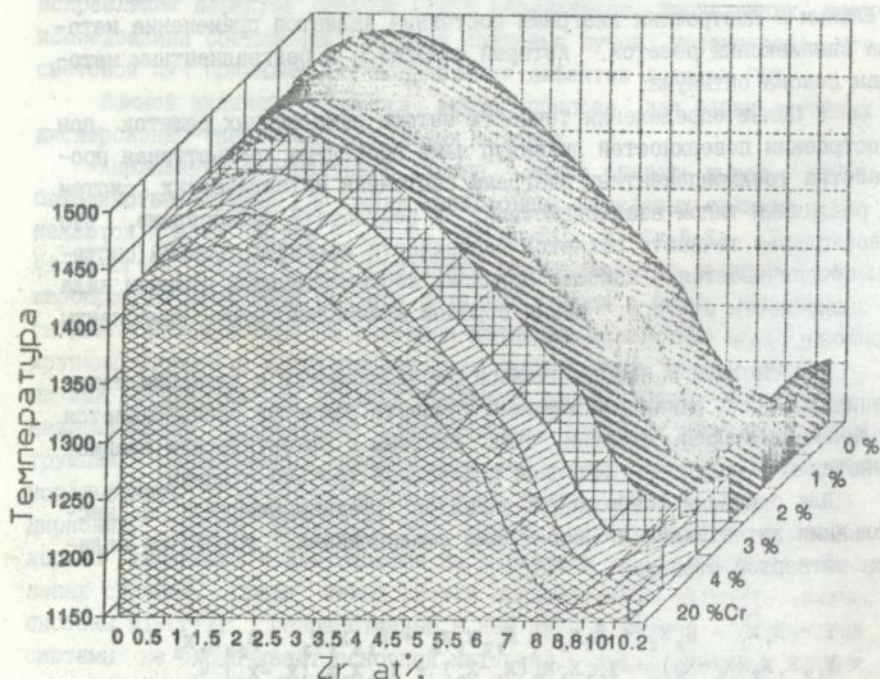


Рис. 2. Поверхность ликвидус никелевого угла системы Ni-Cr-Zr.

Таким образом, с помощью компьютерного расчета можно прогнозировать поверхность ликвидус сплавов тройной системы Ni-Cr-Zr с удовлетворительной точностью при правильном выборе формы полинома. На основании анализа литературных данных и результатов компьютерного прогнозирования поверхности ликвидуса системы Ni-Cr-Zr в никелевом угле выбрали оптимальную концентрацию циркония.

В экспериментах использовался композиционный припой - смесь основного материала ЧС88 с 13% циркония. Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с припоем ВПр-42 системы Ni-Cr-B-Si.

Металлографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ показывает, что структура металла шва соединений, выполненных припоем с цирконием, представляет собой матрицу, на фоне которой выделяются темные игольчатые дендриты и дисперсно по всему шву распределяются эвтектические выделения.

Матрица является твердым раствором хрома (18-19%), кобальта (13%), вольфрама (16.0%), титана (4%) и других легирующих элементов в никеле. Темные игольчатые дендриты являются фазами на основе Ni-Cr-Co с повышенным содержанием титана (7%), молибдена (2%) и алюминия (3%). Эвтектики характеризуются повышенным содержанием циркония (до 22%) и никеля (до 69.9%), и пониженным содержанием хрома (4-6%), вольфрама (0.7-1.5%) и молибдена (0.5-0.7%).

Металл шва, паянного припоем ВПр-42, представляет собой твердый раствор, содержащий дендриты и белые выделения эвтектического происхождения, причем более выражена эрозия основного металла, чем в случае применения припоя с цирконием. Твердый раствор характерен повышенным содержанием кремния (11%), титана (5%), пониженным вольфрама (1.7%), хрома (6%). Белые выделения являются боридами никеля, вольфрама (16%), хрома (16%), кобальта (12%). Темные дендриты содержат 56% Ni, 13.7% Co, 14.2% Cr, 3.4% Al, 6% W и др.

Таким образом, припой системы Ni-Cr-Zr обеспечивает более благоприятные литые структуры соединений при пайке световым лучом, чем припой системы Ni-Cr-B-Si.

В связи с тем, что лопатки ГТД после литья, как правило, подвергаются высокотемпературному отжигу, в этом случае представляет интерес исследование структурных особенностей паяных соединений после заданного цикла термообработки.

В микроструктуре соединения паяного припоем ВПр-42 наблюдаются серые равноосные зерна твердого раствора, по границам зерен и на линии сплавления с основным сплавом присутствуют темные включения коагулированной эвтектической фазы. Термообработка приводит к перераспределению бора в структурных составляющих. Наибольшее содержание бора отмечается в серых эвтектических фазах (6.4%), а в остальных фазах имеется одинаковое содержание бора (3-4%). Появление боридов хрома в основном металле свидетельствует о интенсивной диффузии бора из паяного шва в основной металл. По сравнению с литой структурой зерна твердого раствора паяного шва обедняются кремнием из-за его перехода в эвтектические фазы.

Таблица 2.

Распределение микротвердости НV в отдельных зонах соединения литейного никелевого сплава.

Состояние структуры	Тип припоя	Исследованные участки		
		основной материал	диффузионная зона	паяный шов
Литая структура	ВПр-42	322	350	405
			345...351	351...446
	Ni-Cr-Zr	322	320	308
			310...325	270...333
Структура после термообработки	ВПр-42	357	400	582
			397...411	525...657
	Ni-Cr-Zr	357	305	405
			297...322	390...421

В соединениях, паянных припоем с цирконием, наблюдаются зерна твердого раствора, на фоне которых распределяются два вида включений. Одни из них имеют эвтектическую структуру, другие присутствуют как отдельные округлые включения. Эвтектика характеризуется высоким содержанием циркония (24.5%). В белых округлых включениях - высокое содержание хрома (до 26.8%), вольфрама (25.9%) и молибдена (13.9%) и минимальное никеля (26.3%).

Важно отметить, что при пайке припоем с цирконием микротвердость паяного шва близка к таковой для основного металла, а микротвердость шва, полученного припоем с бором, заметно выше. Это создает опасность концентрации напряжений и, как следствие, появления трещин (табл. 2).

На основе проведенных исследований нами разработана технология ремонтной пайки поверхностных дефектов лопаток из сплава ЧС88 ГТД с использованием светового луча в качестве источника нагрева и припоя системы Ni-Cr-Zr.

Пайка осуществлялась световым лучом на установке УРАН-1 при вертикальном расположении оптической оси радиационного излучателя и направлении перемещения пучка сверху-вниз. Зону нагрева располагали в центре пятна диаметром 60 мм.

После пайки лопатки подвергали контролю внешним осмотром и цветной дефектоскопией. Установлено, что разработанная технология обеспечивает получение высокого качества ремонта лопаток.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Разработаны научно-обоснованные рекомендации светолучевой пайки различных материалов и сплавов. Важным преимуществом этого способа является то, что светолучевой нагрев - бесконтактный и может быть осуществлен на воздухе, в инертной среде и в вакууме.

Установлено, что нагрев световым лучом не изменяет, как правило, фазовый состав паяных швов различных металлических материалов, оказывая влияние на объемную долю фаз, их дисперсность и характер распределения в структуре.

2. Установлено, что в случае нахлесточных соединений стали 12Х18Н10Т способ пайки световым лучом припоем системы Si-Mn, способствует повышению в 2 раза долговечности в малоцикловой области усталости, по сравнению с однопипными соединениями, паянными ТВЧ.

ЛНБ чл. В. Стефанья
АН України

Показано, что прочность на растяжение нахлесточных соединений тонколистовой стали 12X18H10T, паянных припоями систем Cu-Mn, Cu-Zn, Ni-Mn, зависит от способа нагрева и величины нахлестки. При пайке световым лучом прочность на сдвиг увеличивается на 20% для припоя системы Cu-Mn и на 9% для припоя системы Cu-Zn, по сравнению с пайкой ТВЧ. Прочность на сдвиг увеличивается с уменьшением размера нахлестки, однако нижняя граница для 90% вероятности рассеивания прочности не зависит от размера нахлестки.

3. Установлено, что прочность паяных световым лучом стыковых соединений меди на 15%, медно-латунных на 26% выше, чем однотипных соединений, паянных газовым пламенем. Прочность стыковых соединений алюминия составляет 0.9 предела прочности основного металла и не уступает однотипным соединениям, паянным ТВЧ.

4. При оценке прочности на растяжение тонколистовых нахлесточных соединений обоснована необходимость учета угла отгибания кромок соединяемых металлов при разрушении. Предложены формулы для определения значений составляющей напряжений на сдвиг.

5. На основании анализа существующих способов пайки для ремонта лопаток газотурбинных двигателей установлено, что предпочтительным способом является пайка с использованием локального нагрева. Высокие показатели работоспособности соединений, паянных световым лучом, и возможность подвода лучистой энергии к нагреваемым изделиям через оптически прозрачную оболочку определяет перспективность этого метода.

6. Богатые никелем сплавы системы Ni-Cr-Zr перспективны для пайки высоколегированных никелевых сплавов. Однако эта система изучена недостаточно. На основе симплекс-метода проведено компьютерное прогнозирование поверхности ликвидус сплавов системы Ni-Cr-Zr, а также более детально - части поверхности в области никелевого угла.

7. Исследованы структурные особенности паянных соединений литейного никелевого сплава, выполненных припоем ВПр-42 и композиционным припоем с цирконием. Установлено, что припой с цирконием обеспечивает более низкую, чем борсодержащие припои, микротвердость шва, близкую к основному металлу. Это снижает опасность образования трещин.

8. На основе проведенного комплекса исследований разработаны основы технологии высокотемпературной пайки в вакууме поверх-

ностных дефектов лопаток турбин с использованием светового луча и припой системы Ni-Cr-Zr.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Сварка и пайка различных материалов с использованием светового луча дуговых ксеноновых ламп (обзор литературы) / В. Ф. Хорунов, Шань Цзиго // Автомат. сварка. - 1995. - № 5. - С. 48-52.

2. Сопротивление усталости паяных и сварных нахлесточных соединений тонколистовой стали 10X18N10T / В. Ф. Хорунов, В. А. Шонин, С. В. Максимова, Шань Цзиго // Автомат. сварка. - 1995. - № 7. - С. 18-20.

3. Прочность паяных нахлесточных соединений тонколистовой стали 12X18N10T при статическом и циклическом нагружении / Шань Цзиго, В. А. Шонин, В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова // Автомат. сварка. - 1996. - № 3. - С. 18-21.

4. В. Ф. Хорунов, В. А. Шонин, С. В. Максимова, Шань Цзиго. Влияние конструктивно-технологического исполнения на работоспособность паяных нахлесточных соединений // Сварные конструкции: Тез. докл. международной конф. (Киев, 18-22 сентября 1995 г.) - Киев, 1995. - С. 37-38.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. В [1] проведен анализ современного состояния применения светового луча в области сварки и пайки. В [2, 4] описана технология пайки нержавеющей стали, исследовано влияние параметров процесса пайки и конструктивных факторов на прочность соединений. В [3] исследовано влияние способов пайки на структуру и механические свойства паяных соединений нержавеющей стали.

АНОТАЦІЯ.

Шань Цзіго. "Структура та властивості паяних з'єднань, одержаних з використанням світлопроменевого нагрівання". Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 "Технологія та устаткування для зварювання та споріднених процесів". Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Київ. 1996 р.

Систематично досліджені характеристики міцності нахлестних та стикових з'єднань корозійностійкої сталі, міді, латуні, алюмінію, одержаних з використанням припоїв систем Cu-Mn, Cu-Zn, Ni-Mn, Cu-P, Al-Si. Проведено співставлення їх з результатами, одержаними при використанні традиційних методів нагрівання. Здійснене комп'ютерне прогнозування поверхні ліквідусу системи Ni-Cr-Zr. Видані рекомендації з використання розробок.

Ключові слова: паяння, світловий луч, світлопроменеве нагрівання, нахлесточні з'єднання, міцність, стомлюваність, припій.

ABSTRACT.

Shan Jiguo. "Structure and properties of brazed joints produced with the use of light beam heating". Manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Sciences (Engineering) in speciality 05.03.06 "Technology and Equipment for Welding and Allied Processes". E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. 1996.

The strength properties of overlap and butt joints of corrosion-resistant steel, cooper, brass, and aluminium, produced using the Cu-Mn, Cu-Zn, Ni-Mn, Cu-P, Al-Si system braze alloys have been studied in a systematic manner. They were compared with the results generated when the traditional heating methods were applied. Computer prediction of the liquidus surface of the Ni-Cr-Zr system has been carried out. Recommendations on the application of the developments have been issued.

Keywords: brazing, light beam, light beam heating, overlap joints, strength, fatigue, braze alloy.

Подп в печ. 05.05.96. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.
Усл. печ.л. I,39. Усл. кр.-отт. I,62. Уч.-изд.л. I,51. Тираж 100
экз. Зак. 6-98р. Бесплатно.

ИЭС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.
ПОП ИЭС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.

446236

AB34.795

AB 34.795